# SEGURANÇA HÍDRICA URBANA EM MACEIÓ (AL) DIANTE DO DESASTRE DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO: ABORDAGEM MCDA-GIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE VULNERABILIDADES E APOIO À ADAPTAÇÃO

*Andressa Ellen Apolinário [1] ; Wesley Douglas Oliveira Silva [2] & Iago José de Lima Silva [3]*

**Palavras-Chave** – Análise espacial, Análise fatorial exploratória, Realocação populacional.

## INTRODUÇÃO

A segurança hídrica urbana (SHU) constitui um dos principais desafios à sustentabilidade das cidades (Srisuwan, 2024), uma vez que resulta da interação entre fatores ambientais, sociais, econômicos e institucionais que influenciam a disponibilidade, o acesso e a qualidade da água (Mukherjee et al., 2022). Nesse contexto, a compreensão das vulnerabilidades territoriais associadas à água torna-se fundamental para o planejamento urbano e para o fortalecimento da capacidade adaptativa dos sistemas urbanos frente a pressões ambientais e socioeconômicas crescentes (Scott et al., 2021).

No Brasil, ainda são limitados os estudos que avaliam a SHU sob uma perspectiva multidimensional, especialmente em contextos marcados por transformações territoriais decorrentes de desastres socioambientais (Gerlak et al., 2018). Essa lacuna torna-se particularmente relevante em Maceió (AL), onde o processo de subsidência do solo associado à mineração de sal-gema provocou a desocupação de bairros inteiros e a realocação compulsória de cerca de 60 mil pessoas, alterando significativamente a dinâmica urbana do município (Fontana et al., 2023; Hartwig et al., 2023). Além de comprometer a integridade das infraestruturas urbanas, a subsidência potencializa os riscos de inundação, configurando-se como uma ameaça direta à segurança hídrica (Scott, 2024).

Diante disso, este trabalho objetivou avaliar a segurança hídrica urbana de Maceió (AL) por meio de uma abordagem integrada MCDA-GIS, buscando identificar vulnerabilidades socioambientais e compreender como fatores humanos, econômicos, ecossistêmicos e de resiliência influenciam os níveis de SHU em um contexto de transformação territorial induzida por desastre.

## METODOLOGIA

A abordagem metodológica integra geoprocessamento e apoio multicritério à decisão em um modelo MCDA-GIS para avaliação espacial da SHU em nível de bairros (Fig. 1).

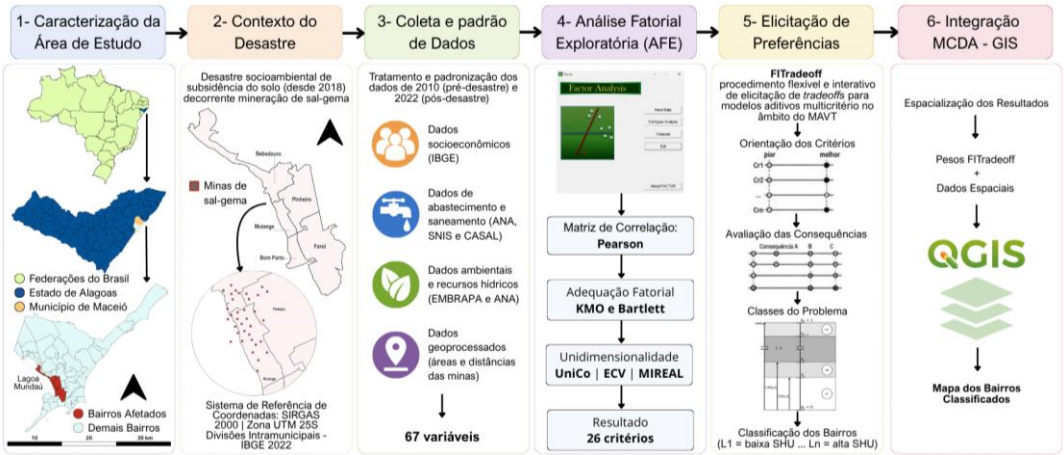



*Figura 1. Estrutura metodológica para avaliação da SHU em Maceió (AL). Fonte: autoria própria (2025).*

1) Afiliação: Mestre do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL), andressaellenadm@hotmail.com;
2) Afiliação Professor do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC-UFAL), wesley.silva@ceca.ufal.br;
3) Afiliação: Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (CTEC/UFAL), iago.silva@icat.ufal.br;

A identificação das variáveis críticas baseou-se na metodologia do Índice de Segurança Hídrica (ISH), proposta pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), adaptada à escala intraurbana e ao contexto do desastre em Maceió, priorizando comparabilidade temporal, relevância teórica e aderência às dimensões. Foram obtidos dados censitários e territoriais referentes aos anos de 2010 e 2022, organizados em quatro dimensões: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência, compostas por critérios relativos ao acesso à água, infraestrutura urbana, pressão ambiental e capacidade adaptativa. Inicialmente, foram levantadas 67 variáveis, posteriormente consolidadas em 26 critérios de avaliação da SHU. Para reduzir a dimensionalidade dos dados e aumentar sua robustez, aplicou-se a Análise Fatorial Exploratória (AFE), por meio do software FACTOR, permitindo identificar fatores latentes e eliminar redundâncias entre variáveis. A adequação das matrizes foi verificada por meio da matriz de correlação de Pearson, do teste de esfericidade de Bartlett e do índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), enquanto a unidimensionalidade dos fatores foi avaliada pelos indicadores UniCo, ECV e MIREAL (Quadro 1).

Quadro 1 – Critérios consolidados por dimensão da SHU

| Dimensão | N° de critérios | Síntese das variáveis |
|---|---|---|
| Humana | 7 | Contingente populacional, acesso à água, saneamento e vulnerabilidade socioespacial |
| Econômica | 4 | Renda, adensamento populacional e infraestrutura urbana |
| Ecossistêmica | 7 | Cobertura e conservação natural, pressão antrópica e ocupações informais |
| Resiliência | 8 | Fontes alternativas, exposição ao risco |

Na etapa de avaliação multicritério, foi utilizado o método Flexible and Interactive Tradeoff (FITradeoff), na problemática de classificação, para obtenção das preferências do decisor e classificação dos bairros em níveis de SHU. O método baseia-se em um modelo aditivo e incorpora informações parciais de preferência do decisor, reduzindo o esforço cognitivo e permitindo maior flexibilidade no processo decisório. Isso possibilita a compensação entre critérios, de modo que desempenhos inferiores em determinados aspectos sejam contrabalanceados por melhores resultados em outros. Os pesos obtidos foram integrados ao ambiente SIG, permitindo a espacialização dos resultados e a elaboração dos mapas de SHU para os cenários de 2010 e 2022, além da identificação de vulnerabilidades socioambientais associadas ao desastre de subsidência do solo.

## RESULTADOS

A modelagem multicritério foi conduzida a partir da elicitação de preferências de um profissional da Defesa Civil atuante desde o início do desastre, incorporando ao modelo a experiência prática na gestão de riscos e emergências. A partir da matriz de avaliação critérios versus bairros, o decisor estabeleceu relações de preferência por meio do método FITradeoff, permitindo a construção da hierarquia de importância entre critérios e a definição dos perfis de classificação da SHU.

A análise evidenciou uma mudança estrutural na lógica decisória entre os cenários avaliados. Em 2010, observou-se a priorização de critérios ecossistêmicos, refletindo uma abordagem orientada à prevenção e à preservação ambiental. Em contraste, no cenário de 2022, os critérios de resiliência e risco, com destaque para a subsidência do solo, assumem centralidade, indicando uma transição para uma lógica adaptativa, diretamente associada à experiência do decisor no contexto do desastre.

As classes de SHU foram definidas com base no benchmarking do ISH, originalmente estruturado em cinco níveis (1 a 5), sendo operacionalizadas em escala contínua normalizada (0–1), conforme requerido pelo FITradeoff, assegurando consistência metodológica e comparabilidade entre cenários.

A aplicação do modelo resultou na classificação de 100% dos bairros de Maceió, permitindo análise espaço-temporal da SHU e identificação de áreas críticas associadas à realocação populacional. A análise de sensibilidade (±10%) indicou elevada robustez, com acurácia média de 83%, e variações predominantemente restritas a classes adjacentes. Assim, a espacialização dos resultados em mapas

integrados de SHU demonstra um reordenamento das condições de segurança hídrica no território, com intensificação de níveis críticos em áreas receptoras de população deslocada (Fig. 2). Esse padrão indica que a subsidência do solo atua como vetor de redistribuição de vulnerabilidades.

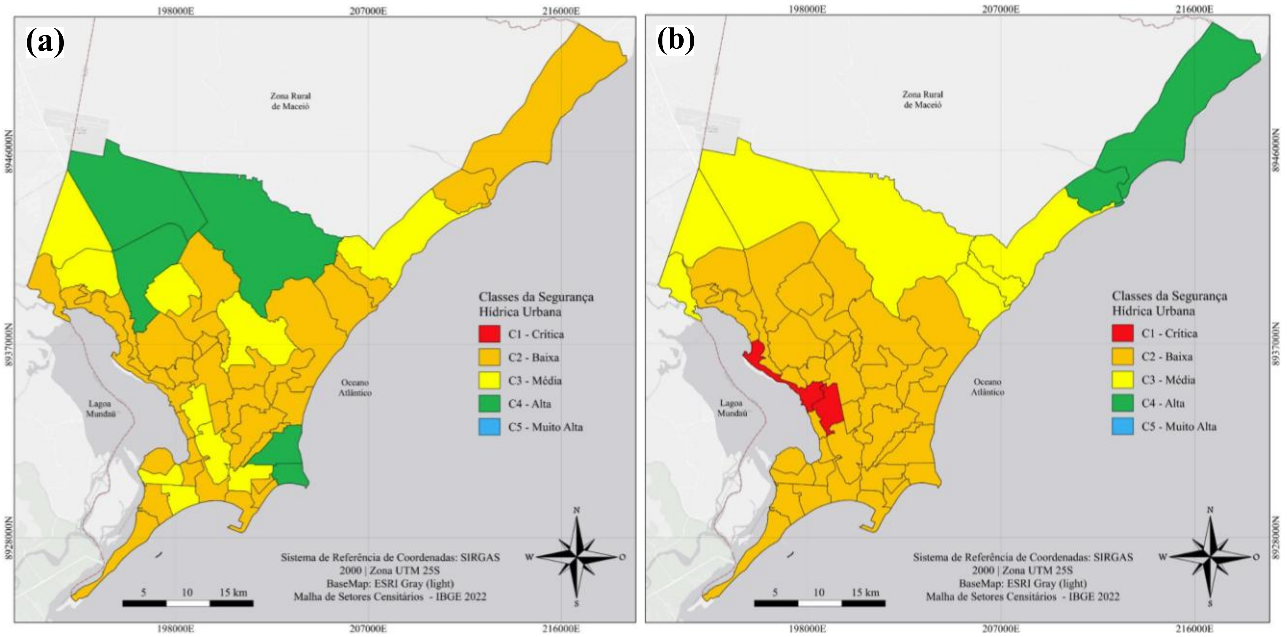



*Figura 2. Cenários da SHU de Maceió em 2010 (a) e 2022 (b). Fonte: autoria própria (2025).*

A análise espacial dos cenários evidencia diferenças estruturais na distribuição da SHU ao longo do tempo. Em 2010 (Fig. 2a), observa-se predominância das classes Baixa e Média, com ocorrência pontual de níveis mais elevados de SHU em áreas com menor adensamento populacional e maior presença de cobertura natural, o que indica o papel dos fatores ecossistêmicos na regulação hídrica. Em contrapartida, áreas periféricas e mais densamente urbanizadas concentraram os menores níveis de SHU, refletindo déficits estruturais de saneamento e maior vulnerabilidade socioambiental.

No cenário de 2022 (Fig. 2b), verifica-se uma reconfiguração espacial marcada pela expansão da classe Baixa em grande parte do território, indicando agravamento das condições de segurança hídrica. Áreas diretamente afetadas pela subsidência apresentam níveis críticos, evidenciando o comprometimento simultâneo das condições habitacionais, ambientais e de infraestrutura. Por outro lado, regiões menos urbanizadas e mais distantes das áreas de mineração mantiveram melhores níveis relativos de SHU, associados à menor pressão sobre os sistemas hídricos.

Comparativamente, os resultados indicam uma tendência de deterioração da SHU, com aumento expressivo de bairros em condições de baixa segurança hídrica, associado principalmente à realocação populacional e ao consequente adensamento urbano em áreas vulneráveis. Esse processo intensificou pressões sobre a infraestrutura de abastecimento e saneamento, evidenciando a subsidência como um vetor indireto de ampliação das desigualdades socioespaciais.

Do ponto de vista metodológico, o uso do FITradeoff demonstrou elevada adequação ao problema, ao permitir a elicitação progressiva de preferências, redução do esforço cognitivo e obtenção de uma solução robusta mesmo sob incerteza. A estabilidade dos resultados frente à variação dos parâmetros reforça a consistência do modelo e sua aplicabilidade em contextos complexos de decisão territorial.

Em síntese, os achados evidenciam que a subsidência do solo atua como vetor indireto de reconfiguração da segurança hídrica urbana, ao redistribuir vulnerabilidades no território e reforçar desigualdades socioespaciais. A integração entre modelagem multicritério e análise espacial demonstrou elevada capacidade de representar essas dinâmicas, constituindo uma base robusta para apoio à tomada de decisão em contextos urbanos complexos.

## CONCLUSÕES

A aplicação do FITradeoff permitiu classificar os bairros de Maceió em níveis de segurança hídrica para os cenários de 2010 e 2022, evidenciando mudanças espaciais relevantes associadas à realocação populacional. Observou-se a intensificação de condições críticas de segurança hídrica em áreas receptoras, indicando que o deslocamento populacional atuou como vetor de redistribuição de vulnerabilidades no espaço urbano. A integração entre AFE, FITradeoff e SIG mostrou-se eficaz para identificar territórios mais vulneráveis e subsidiar o planejamento adaptativo, contribuindo para o fortalecimento da resiliência urbana e da tomada de decisão em contextos de desastre. Além disso, os resultados evidenciam que os impactos da subsidência do solo extrapolam as áreas diretamente afetadas, reforçando a necessidade de integrar a segurança hídrica ao planejamento territorial e às estratégias de adaptação em áreas urbanas vulneráveis.

## REFERÊNCIAS

Fontana, M. E., Levino, N. de A., Guarnieri, P., & Salehi, S. (2023). Using Group Decision-Making to assess the negative environmental, social and economic impacts of unstable rock salt mines in Maceio, Brazil. The Extractive Industries and Society, 16, 101360. https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101360

Gerlak, A. K., House-Peters, L., Varady, R. G., Albrecht, T., Zúñiga-Terán, A., de Grenade, R. R., Cook, C., & Scott, C. A. (2018). Water security: A review of place-based research. Environmental Science & Policy, 82, 79–89. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.009

Hartwig, M. E., Gama, F. F., da Silva, J. L., Jofré, G. C., & Mura, J. C. (2023). The significance of geological structures on the subsidence phenomenon at the Maceió salt dissolution field (Brazil). Acta Geotechnica, 18(10), 5551–5573. https://doi.org/10.1007/s11440-023-01846-z

Mukherjee, S., Sundberg, T., Sikdar, P. K., & Schütt, B. (2022). An Integrated Quantitative Assessment of Urban Water Security of a Megacity in the Global South. Frontiers in Water, 4. https://doi.org/10.3389/frwa.2022.834239

Scott, C. A. (2024). Land subsidence in the Mid-Atlantic United States: Creeping disaster threatens water, energy, and climate security. Water Security, 23, 100183. https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100183

Scott, C. A., Zilio, M. I., Harmon, T., Zuniga-Teran, A., Díaz-Caravantes, R., Hoyos, N., Perillo, G. M. E., Meza, F., Varady, R. G., Neto, A. R., Velez, M. I., Martín, F., Escobar, J., Piccolo, M. C., Mussetta, P., Montenegro, S., Rusak, J. A., & Pineda, N. (2021). Do ecosystem insecurity and social vulnerability lead to failure of water security? Environmental Development, 38, 100606. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100606

Srisuwan, A. (2024). Urban water security in multidisciplinary practices: A case of Lamphun Municipality, Thailand. Journal of Urban Management, 13(3), 456–468. https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.06.002

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL).